

Comunicaciones ópticas

Situación y perspectivas

En este artículo se plantean dos de los temas más controvertidos actualmente en Comunicaciones Ópticas, como son el de la Conmutación Fotónica y los Amplificadores de Fibra Óptica. Ambos temas se plantean desde un punto de vista general, indicando cuál es la tendencia previsible en cada uno de ellos y dando la filosofía general de su actuación y las razones para su presencia.

J.A. Martín Pereda

Optical Communications A progress report

Two of the most controversial topics in recent Optical Communications are reported in this paper. They are Photonic Switching and Fiber Laser Amplifiers. A general view is given with their possible future trends, reasons for their existence and general methods of working.

Introducción

En una reciente entrevista [1], Ian Ross, presidente de Bell Labs, no tiene la más mínima duda en señalar que las tres áreas de Investigación y Desarrollo más importantes para la industria de las Telecomunicaciones son la Microelectrónica, la Fotónica y el Software. De la primera y la última, no cabe hablar en este momento, dado que el objeto de estas líneas no es ese. Sí lo es, en cambio, la segunda ya que su eje principal es, hoy por hoy, todo lo relacionado con las Comunicaciones Ópticas. Y éste sí es el tema que nos atañe ahora. Ian Ross señala que una de las formas más significativas de indicar cuál es el avance de este campo, es la de medir el progreso que se va realizando en el número de bits por segundo que se puede introducir por el extremo de una fibra óptica, multiplicados por la distancia que pueden recorrer antes de que necesiten ser regenerados. Este factor, y aquí está el hecho significativo, se duplica cada año. Acaba diciendo que todavía queda mucha Física por delante antes de que sea preciso recurrir a algo diferente a los fotones. Con un poco de

suerte, no duda en señalar, tendremos con ellos hasta el fin de este siglo.

He querido iniciar este breve artículo de puesta al día en comunicaciones ópticas con las anteriores opiniones porque el objetivo que voy a intentar trazar hoy no va a ser otro que el de entrever hacia dónde se irán desplazando los nuevos derroteros de las transmisiones de información por medios fotónicos y su previo o posterior procesado. En un artículo que publiqué en estas mismas páginas hace poco más dos años [2], un espíritu un tanto pesimista me debía invadir por entonces porque, queriendo entrever el futuro en la bola de cristal, decía algo así como que casi todo lo que en él había escrito quedaría obsoleto en muy poco tiempo. Para descanso de estudiosos y respiro de comunicadores, las cosas no han ido tan rápidas. Todavía nos podemos manejar con muchos de los conceptos que aprendimos entonces. Sólo nos falta tener en cuenta el factor de duplicación que nos indicaba Ian Ross y con él las cosas de entonces casi siguen estando como estaban en aquel momento.

Así, por ejemplo, las fibras no han evolucionado de una manera absolutamente drástica; sus perfiles de índice siguen siendo casi los mismos que se veían en el 86. Tan sólo han variado algunos de los números que las caracterizaban: sus atenuaciones han llegado ya casi a las cercanías de su mínimo posible y, poco a poco, las dispersiones que introducen se reducen cada vez más. Los láseres de semiconductores son, por otra parte, cada vez más fiables, más rápidos, de mayor potencia, de espectro más reducido y, lo que es peor para los que tratan de acercarse a ellos con afanes de fabricación, cada vez más sofisticados. Los detectores son algo más rápidos y bastante más sensibles. Pero tanto en un caso como en otro, en los láseres y en los receptores siguen vigentes casi los mismos conceptos que hace un par de años.

Cabría preguntarse en consecuencia por lo que ha surgido de nuevo o, al menos, por lo que ha adquirido

una mayor importancia o un mayor protagonismo desde entonces. Y a ello voy a dedicar el resto del presente artículo que, para aclarar más los conceptos, voy a centrar en tan sólo unos breves temas. No será un artículo exhaustivo de lo que hay, sino que pretende ser un boceto de lo que se espera.

Nuevas vías para satisfacer unas necesidades

Cuando se introdujeron por primera vez las comunicaciones ópticas en el terreno de la técnica, lo primero que apareció ante sus promotores era que aquello distaba todavía mucho de que, realmente, pudiera ser designado en su más completa acepción como puramente óptico. Era óptico el intervalo comprendido entre el láser emisor de la radiación óptica que llevaba la información y el detector que la recibía. Estos dos elementos, conjuntamente con la fibra óptica, eran lo único que tenía carácter óptico. El resto, desde que se generaba la información y se manipulaba, hasta que, como señal eléctrica llegaba al láser o al LED, poco tenía que le diferenciase de una pura comunicación tradicional. Y algo análogo ocurría desde que, una vez recibida en el detector y transformada nuevamente en señal eléctrica, pasaba a ser modificada para su adecuado uso. Para que todo aquello fuera realmente una «comunicación óptica» debería contar con los componentes necesarios para que la señal que se intentaba transmitir, se manipulase, se encaminase y se regenerase sin necesidad de ninguna apoyatura electrónica y, lo que es aún más importante, que se pudiera hacer todo ello por procedimientos puramente ópticos. La mayor parte de esto ha tenido su entrada en escena, al menos con carácter de un ensayo no todavía general, en los últimos años. Estas últimas tendencias, conjuntamente con algunos de los resultados más significativos conseguidos, serán contempladas en este artículo.

Y en primer lugar, para justificar la elección hecha, cabría plantearse cuáles deberían ser las etapas que unas verdaderas comunicaciones ópticas deberían cubrir. Y quizá la que en una primera instancia surge es la obvia de que las señales ópticas se encaminen por las vías adecuadas de una forma directa, esto es, sin la conversión o la influencia de otras señales eléctricas. Este tema es el objetivo central de la hoy denominada «conmutación fotónica» y constituye el punto central de las actividades de la mayor parte de los laboratorios del sector. Su base más significativa se encuentra en otra área de especial actividad en los últimos años, aunque su concepto inicial se retrotraiga al principio de los setenta, que es el de la óptica integrada. Ambos unidos hacia una misma meta, han encontrado al fin un camino que hasta hace no mucho estaba un tanto cubierto de dudas y vacilaciones. Ambos serán tema de nuestras líneas.

Y la siguiente etapa no es otra que la de conseguir formas de regeneración óptica de las señales que se están transmitiendo. O lo que es lo mismo, que existan amplificadores ópticos de los pulsos de luz que se están propagando por la fibra. La forma tradicional de conseguirlo ha sido la de convertir al pulso óptico en otro eléctrico, hacer con él las operaciones precisas para que vuelva a tener la forma o la intensidad apropiada y

volver a transformarlo en señal luminosa. Esto, como puede inferirse fácilmente, entre otras cosas supone, por ejemplo, un retraso de tiempo que puede trastocar la intrínseca velocidad de las comunicaciones ópticas. Sería muy conveniente, primero, que no existiese ese cambio de óptica a electrónica y viceversa, y, segundo, que pudiera hacerse en la propia fibra óptica. Este tema será también objeto de estas líneas y constituye lo que denominaremos amplificadores y láseres de fibra óptica.

Óptica integrada y conmutación fotónica

Es obligado iniciar este apartado con uno de los temas más controvertidos en los últimos años en este terreno y este tema es el del material que debe servir de base a los circuitos a desarrollar en óptica integrada.

Durante mucho tiempo el principal protagonista de casi todo lo que se realizaba con fines de demostración de posibilidades era el niobato de litio, NbO_3Li . La mayor parte de los desarrollos presentados en foros y revistas le tenían como principal actor y sobre él se llevó a cabo una muy intensa actividad en el desarrollo de guías integradas. Este camino empezó a tener algunos detractores que, entre otros inconvenientes, alegaban que no era apto para llevar a cabo sobre él una verdadera óptica integrada dado que no permitía la fabricación de dispositivos activos. Además de esto, otros indicaban que quizás sería conveniente pensar en un material más económico con el que se tuviera una mayor familiaridad como, por ejemplo, el silicio. Algunos otros, finalmente, pensaban que quizás ciertos materiales poliméricos podían ser los adecuados para la realización de determinados tipos de guías e, incluso, de una cierta familia de dispositivos integrados. Hoy parece que han llegado a un mismo punto de encuentro y todos, los partidarios de unos y otros materiales, han podido ver que sus protegidos tienen papel en la obra. Como este tema es de primordial importancia para las futuras comunicaciones ópticas es conveniente que nos detengamos un momento en cada uno de ellos para ver sus ventajas e inconvenientes.

Materiales para óptica integrada

Niobato de litio

El hecho más significativo del que es obligado partir al hablar de materiales para la óptica integrada es que el dominante en la actualidad es el niobato de litio. Este hecho no es discutido por nadie y tiene una raíz muy sencilla que ya ha sido comentada anteriormente: fue el primero y es el que más esfuerzos ha recibido en todo el mundo para su desarrollo. Su tecnología más simple está hoy bien asentada, existen una gran cantidad de laboratorios en todo el mundo que la poseen y no es demasiado complicada. Han aparecido ya en el mercado varios fabricantes que lo tienen como principal elemento y esto nos dice que su fiabilidad está ya fuera de toda discusión. Por otra parte, las etapas para la fabricación de guías sobre él son bastante convencionales y, repitiendo lo dicho antes, casi sencillas, al menos conceptualmente. Sus etapas básicas aparecen en la

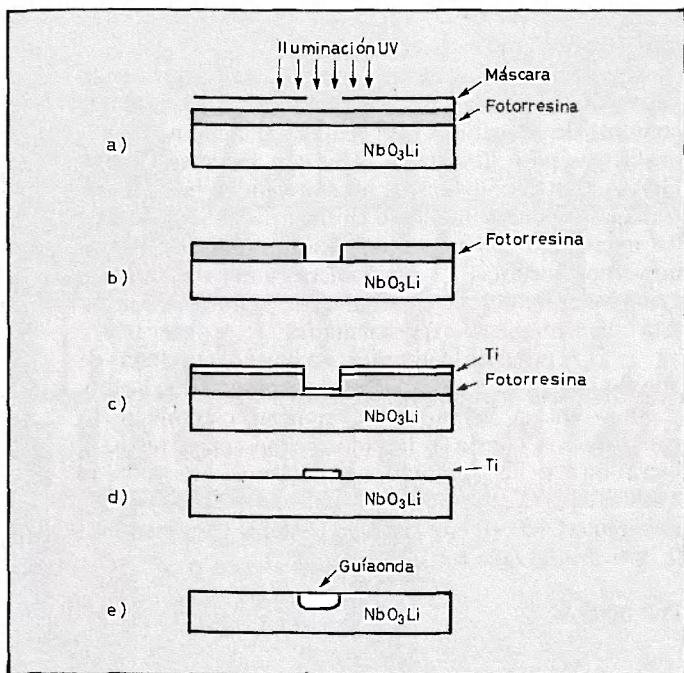


Figura 1. Esquema de las etapas de fabricación de guías ópticas integradas. a) Exposición. b) Revelado. c) Metalización. d) Pelado. e) Difusión.

figura 1 para la fabricación de una guía óptica y en la figura 2 para la de electrodos sobre ella. Como puede verse, se trata de una simple difusión de titanio en el primer caso y de una típica metalización en el segundo.

A las anteriores ventajas del NbO_3Li se une una que le hace resaltar con respecto al resto: posee unas excelentes propiedades piezo y electroópticas. Gracias a esto pueden desarrollarse con él moduladores y conmutadores

capaces de trabajar a muy altas velocidades. Así, anchos de banda de algunos gigahertzios se consiguen sin dificultad y, en concreto, moduladores con anchos de banda superiores a los 24 GHz han sido presentados en la literatura. Por otra parte algunos circuitos de baja velocidad, como transformadores de polarización, filtros sintonizables o conmutadores, son también factibles de desarrollar sin grandes problemas.

Estas ventajas se contrapesan con otros inconvenientes menores y mayores. El primero no es otro que el de que es un material relativamente caro, al menos hoy. El segundo se relaciona con la dificultad de conseguir sustratos con un tamaño relativamente grande. Este hecho dificulta la integración de un número alto de componentes sobre el mismo y más en el caso de la óptica integrada, donde por razones en las que no vamos a entrar ahora, es necesario alrededor de un 60 % de la superficie sólo para lograr las curvaturas adecuadas en las guías ópticas. Si a esto añadimos el hecho de la imposibilidad física de conseguir dispositivos activos con él, todo el conjunto de armas suficientes a aquellos que lo han criticado en los últimos años.

Silicio

El silicio tiene hoy una importancia absoluta que nadie puede discutir. Con él ha adquirido la microelectrónica su mayoría de edad y aún le quedan muchos años de protagonismo absoluto en casi todos los campos. Todos sus procesos están por completo dominados y, lo que es más importante, cristales de este material pueden conseguirse, al mismo tiempo, con gran pureza y con un costo relativamente bajo. Todo esto hace de él un candidato en el que todos los ojos se posan cuando se pretende desarrollar un nuevo componente.

Pero, para empezar, aunque semiconductor, no posee propiedades ópticas apreciables por su gap indirecto. Además, no tiene ningún tipo de efecto electroóptico que permita realizar con él dispositivos semiactivos como los que se desarrollan con el niobato de litio. Y, finalmente, cuando hace algunos años se empezó a estudiar en este campo, su alta absorción entre las 0,8 y las 0,9 micras, que era la primera región en la que se empezó a considerar, lo imposibilitaba para su uso.

Afortunadamente, la región de interés hoy en comunicaciones ópticas es la comprendida entre 1,3 y 1,6 micras. Y ahí el silicio es transparente. Esto permite la posible integración de estructuras que, aunque pasivas, pueden ser capaces de guiar la luz si se disponen los índices de refracción adecuados. Cuatro de las posibles configuraciones son las que aparecen en la figura 3. En casi todas ellas el juego se reparte entre el propio silicio y su óxido, constituyendo éste el material de índice de refracción más bajo y el que, en consecuencia, permite el guiado.

Todo lo anterior da unas posibilidades que podrían ser muy interesantes si se conjugasen con algún tipo de efecto optoelectrónico. El silicio por sí solo no es muy proclive a ello, pero desde hace algún tiempo se ha demostrado que es posible crear estructuras de compuestos III-V sobre sustratos de este material. Así, varias configuraciones de láseres de GaAs/AlGaAs, con umbral bastante reducido (600 A/cm), crecidas sobre sustratos de silicio, han sido presentadas recientemente.

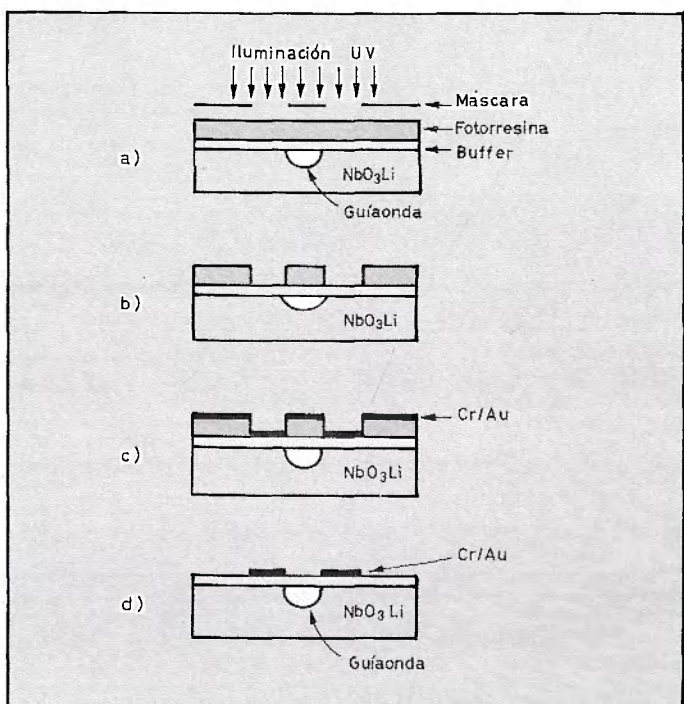


Figura 2. Esquema de las etapas necesarias para la deposición de electrodos en guías ópticas integradas. a) Exposición. b) Revelado. c) Metalización. d) Pelado.

te. Y esto permite albergar fundadas esperanzas de un prometedor matrimonio entre las tecnologías del Si y del AsGa.

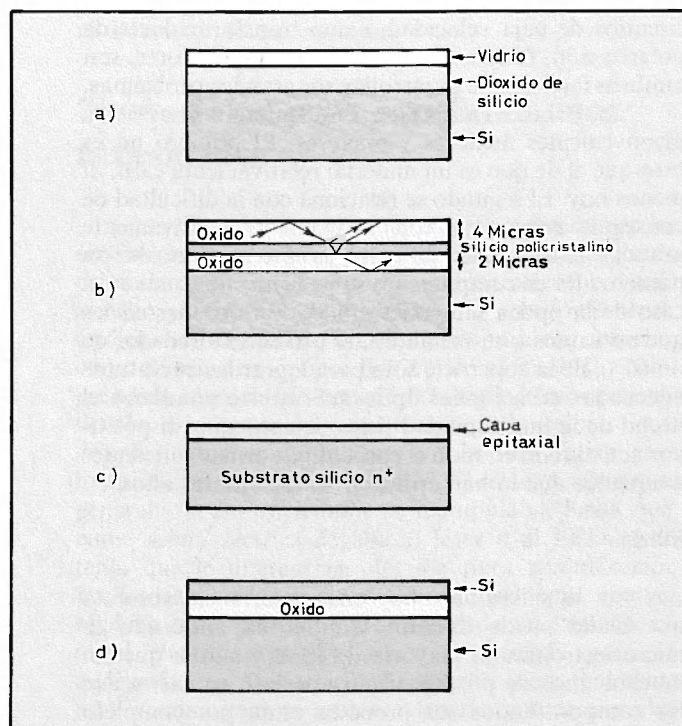


Figura 3. Algunos tipos posibles de guías ópticas integradas sobre substratos de silicio.

Materiales compuestos III-V

Si por óptica integrada se entiende la posibilidad de fabricar todo un conjunto de componentes, tanto activos como pasivos, sobre un mismo substrato, el único material que lo puede ofrecer es la familia de los semiconductores compuestos III-V. Ellos dan pie para la fabricación, al mismo tiempo, de emisores de luz, configuraciones que la guíen y elementos que sean capaces de recibirla. Ninguno de los presentados en los anteriores apartados ofrece esta gama de posibilidades. Desde ese punto de vista podría decirse que los compuestos III-V son los materiales más idóneos para cualquier óptica integrada futura que se pretenda establecer. Y de hecho muchos son los que opinan así. Sus propiedades electroópticas son, asimismo, apreciables y capaces de configurar dispositivos moduladores y de conmutación de alta velocidad, así como configuraciones para multiplexado y demultiplexado. Desde el principio de la década de los 70 no han cesado de publicarse experiencias de este tipo. Todas las nuevas tecnologías de crecimiento desarrolladas en los últimos años, tales como la deposición de vapor de organometálicos (MOCVD) y la epitaxia de haz molecular (MBE), han incrementado las potencialidades de estos materiales. Así, y a modo de ejemplo, en la figura 4 aparece una típica estructura de guiado de radiación óptica. A pesar de todo ello, aún queda bastante camino que recorrer en este campo, dado que, por el momento, resulta bastante difícil conseguir guías de bajas pérdidas. El resultado más favorable publicado hasta hoy se encuentra en las

proximidades de los 0,5 dB/cm, cifra por encima de la obtenida con los otros materiales.

El otro factor que puede significar hoy un ligero inconveniente para el desarrollo de todo un conjunto de estructuras es el de que, así como no habría problemas para llevarlas a cabo con sistemas GaAs/GaAlAs, estos compuestos no son válidos hoy ya que trabajan fundamentalmente en torno al margen de los 0,8 micras. Su uso en comunicaciones ópticas obliga a movernos hacia las 1,3 ó 1,5 micras y ahí el candidato más idóneo es el InP, material cuya tecnología aún no está suficientemente experimentada.

A pesar de lo anterior, no hay apenas dudas de que el futuro está en torno a estos materiales. De hecho, y como en un intento de diferenciar claramente lo realizado con ellos a lo llevado a cabo con el resto, la literatura ya ha asentado un nombre para toda la actividad centrada con ellos. Es la optoelectrónica integrada (OEI), diferenciada ya bastante claramente de la óptica integrada (OI).

Polímeros

De igual manera a como las fibras de plástico están encontrando un importante nicho en industrias como la del automóvil o en medicina, algunas compañías han desarrollado tecnologías que, basándose en el uso de guías poliméricas, son compatibles con dichos tipos de fibras.

Los substratos que sirven de soporte son plásticos de bajo coste y sobre ellos se realizan todas las operaciones convencionales de fotolitografía que sirven para la configuración de las pistas conductoras de luz. Estas pistas son canales realizados sobre el substrato, que se rellenan de un cierto tipo de cementos ópticos a los que se fijan las fibras de entrada y salida. Como las

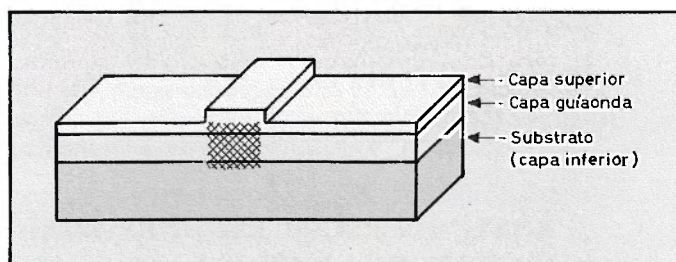


Figura 4. Configuración guíaonda de canal realizada mediante capas múltiples de aleaciones de semiconductores compuestos, tales como el Ga Al As. La región sombreada indica el lugar donde la mayor parte de la radiación queda confinada.

normalmente empleadas en este sector son de diámetros comprendidos entre 250 y 1000 micras, no parece que existan requisitos demasiado estrictos que impidan una verdadera fabricación en serie. Dispositivos del tipo divisores y mezcladores han sido ya presentados en el mercado.

El camino que parece podría intentarse seguir es el de ampliar estos conceptos a otro tipo de substratos, tales como vidrios o silicios, y sobre las acanaladuras realizadas sobre ellos, depositar polímeros conductores de luz. Este tema, dadas sus innegables ventajas por la previsible facilidad de fabricación y, lo

que es más importante aún, por su bajo coste, parece que puede dar bastante juego en los próximos años. De hecho, algunos de los laboratorios más importantes de Europa y Estados Unidos han iniciado líneas de investigación en este sentido.

Conmutación fotónica

Cabría preguntarse, en primer lugar, qué es lo que se entiende por conmutación fotónica. Y las respuestas, como suele ser usual en un campo de relativamente reciente aparición, pueden ser tan variadas como interlocutores se tengan. Quizás, de una forma un tanto amplia, todas ellas serían también verdaderas. Mucho es lo que se ha hecho ya en los últimos tres años, pero mucho más es aún lo que queda por hacer. A la vista de ello lo único que se puede plantear en este momento es intentar abarcar de una manera un tanto errática y casi de inventario, lo que más o menos aparece en la literatura del tema cuando se habla de conmutación fotónica.

Y para llevar a cabo lo propuesto, quizás el método más inmediato es plantear, una vez más, lo que en anteriores apartados ya se ha esbozado y que aquí se desarrollará con un mayor detalle. Este hecho es el de la consecución de unas totales comunicaciones ópticas.

El punto de partida debería ser el de tener presente, como hecho fundamental, la región del espectro electromagnético en el que todos los fenómenos aquí empleados deben tener lugar. De acuerdo con los más recientes estudios sobre el futuro de las fibras ópticas, la zona que presenta todas las ventajas es la comprendida entre 1,5 y 1,6 micras. Esto quiere decir que nos encontramos con una anchura espectral de alrededor de los 20.000 GHz. Para poder usarla en su totalidad, el primer requisito que se nos presenta es el de disponer de láseres sintonizables que puedan cubrir toda esta banda. Esto es algo que, con mayor o menor velocidad, se está consiguiendo y podemos dar por descontado que en pocos años se alcanzará todo el objetivo propuesto. Y una vez disponibles los emisores adecuados, el siguiente paso consiste en realizar con ellos la transmisión más idónea. Parece obvio que uno de los métodos más inmediatos sería el de transmitir a lo largo de un mismo camino óptico un número muy elevado de canales simultáneos, cada uno de ellos con su propia longitud de onda portadora. En función de esto, la situación que se presenta es la de una especie de red local (LAN) en la que hay que introducir los métodos adecuados para el encaminamiento de las señales a sus puntos correctos de destino. Estas redes (figura 5), gobernadas por longitudes de onda, tienen la forma habitual de estrella, con un nudo central que es donde se produce la función inteligente del encaminamiento, o de bus. Esta situación, evidentemente, no tiene nada de nuevo con respecto a las actuales, salvo en el hecho fundamental de la multiplexación en longitudes de onda. Han de introducirse dispositivos que permitan primero la introducción de señales con diferentes longitudes de onda a un mismo camino óptico y, posteriormente, su demultiplexado hacia los receptores deseados. Los métodos electrónicos dejan aquí de tener significado y es obligada la introducción de métodos puramente ópticos. Y ésta es una de las tareas de la

conmutación fotónica. Toda una amplia gama de propuestas han surgido intentando resolver de manera eficiente y, lo que es más importante, económica, esta problemática. El conjunto constituye toda una familia de dispositivos que, por sí sola, daría lugar a varios artículos monográficos. Aquí sólo se ha pretendido plantear el problema.

Por otra parte, no es sólo el tema de que diferentes señales con diferentes longitudes de onda han de caminar por el mismo canal físico, sino también el que señales con las mismas frecuencias ópticas, pueden ir a diferentes destinos o pueden llevar diferentes tipos

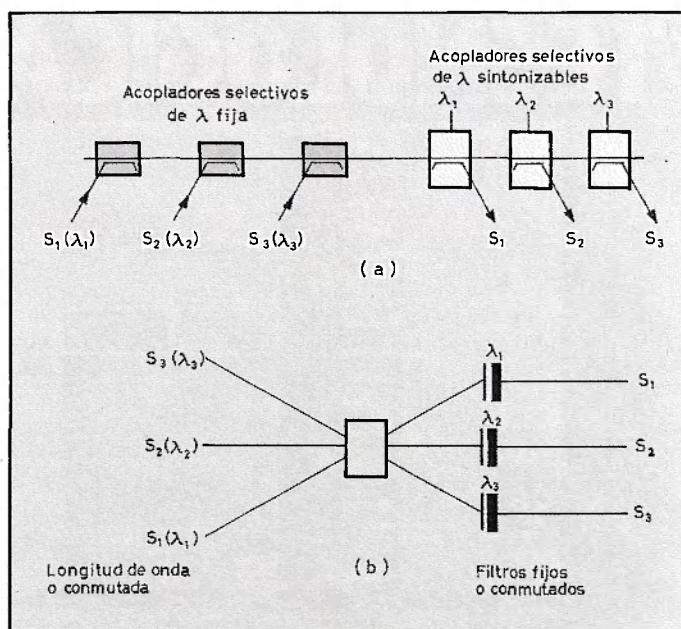


Figura 5. Sistema de multiplexado por longitud de onda. a) Configuración bus o serie. b) Configuración en estrella.

de conmutación. Y con esto nos estamos refiriendo a las diferentes maneras en que se pueden manejar flujos de datos, las cuales pueden ser, por ejemplo, multiplexación por división de tiempo (TDM), por división en el tiempo asíncrona (ATD) o por formato de paquetes. Dos caminos pueden ser los tomados para resolver el problema: El primero es, simplemente, el de asumir un control eléctrico, estando limitados por las velocidades intrínsecas de los componentes electrónicos involucrados. El segundo, que es ya el que tiene que ver con la conmutación fotónica, trata de encontrar soluciones entre los planteamientos realizados en el campo de la computación óptica. Esto es evidente dado que el proceso de conmutación no difiere mucho del de las operaciones binarias que se llevan a cabo en ese nuevo tipo de ordenadores. En cualquier caso, tanto en conmutación como en computación, los resultados obtenidos hasta la fecha permiten un cierto grado de esperanza aunque ninguno de ellos puede considerarse como definitivo.

En ambos casos, el principal escollo que se encuentra no es el de los propios componentes. Si se tuviese certeza de cuál era el objetivo final, es seguro que en poco tiempo se conseguirían los más adecuados con las propiedades más favorables. El principal problema radica en la falta de una certeza absoluta sobre cuáles

pueden ser las arquitecturas más idóneas. Parece ya un hecho aceptado por casi todos el que las estructuras electrónicas no son las más adecuadas para amoldarse a los nuevos planteamientos de las ópticas. Intentar realizar con componentes ópticos esquemas equivalentes a los tenidos hasta ahora con los electrónicos implicaría perder casi todas las potencialidades que éstos pueden ofrecer. Por una parte, dadas las caracte-

parte porque en estas mismas páginas ya han aparecido algunos artículos que los han estudiado con una cierta profundidad y, por otra, porque nos saldríamos de los límites impuestos.

Estructuras de conmutación

Como ya se ha comentado en el apartado destinado a materiales para óptica integrada, dependiendo de las aplicaciones aparecerá un tipo u otro de configuración. En cualquier caso, el elemento clave de todas ellas son las guías que canalizarán la radiación óptica y su estructura geométrica dependerá de la aplicación a la que estén destinados. Dado que los sistemas de conmutación pueden clasificarse de acuerdo con el parámetro de conmutación, parece obligado presentar aquí los tres más significativos. Son los que aparecen en la figura 6. No detallaremos aquí su forma de trabajo ya que debe ser suficientemente conocida por todos los que han trabajado en conmutación convencional.

Queda precisar cómo son los puntos de cruce entre guías y cómo se produce el paso de unas guías a otras para realizar la conmutación. Y aquí poco puede añadirse de nuevo con respecto a lo ya conocido desde

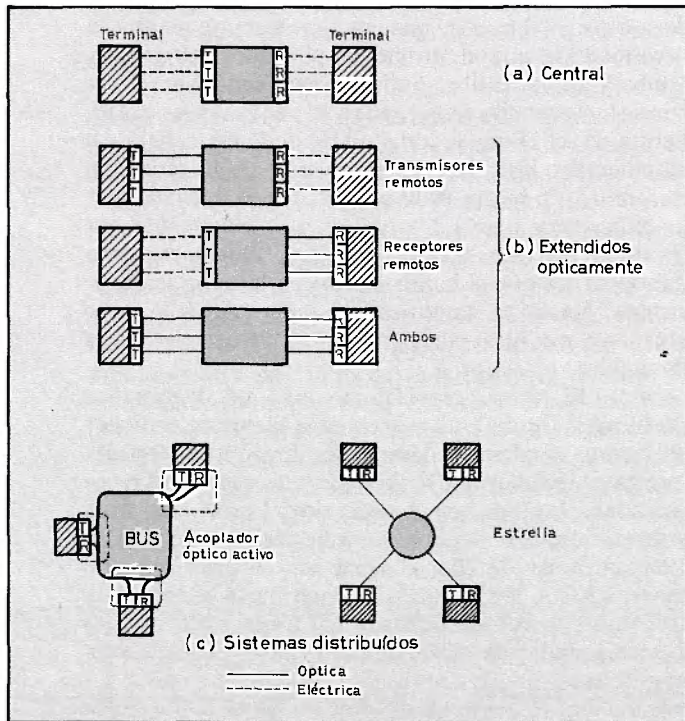


Figura 6: Configuraciones posibles de matrices fotónicas. a) Matriz conectada eléctricamente en una malla indeterminada (central). b) Matriz capaz de recibir y/o producir señales ópticas (extendida). c) Matrices de acceso múltiple de circuitos ópticos (distribuidos) en bus o en estrella.

rísticas del portador de la información, la luz, no es posible realizar estructuras que estén por debajo del tamaño de la longitud de onda con la que se trabaja, las dimensiones de los dispositivos ópticos deberían ser bastante más grandes que las de los equivalentes electrónicos. Los consumos de potencia son, por otra parte, comparativamente mayores. Y resulta así como una especie de entorno desfavorable para la óptica. Pero meditando un poco más a fondo se llega a la conclusión de que existe algo con lo que, inexorablemente, hay que contar. Y no es otra cosa que el carácter de la propia radiación luminosa de permitir cruces entre haces de fotones sin que existan «cortocircuitos» como los que existirían en electrónica. Se puede pasar así a arquitecturas plenamente paralelas sin ningún tipo de precauciones adicionales. Y este es un campo donde todavía queda mucho por hacer.

Parece procedente, en consecuencia, dar ahora unas breves nociones de cuáles son las estructuras en estudio más usuales en este campo, tanto en lo que se refiere a dispositivos más o menos elementales, como a sistemas completos de conmutación fotónica. No se pretenderá dar detalles sobre cada uno de ellos, por una

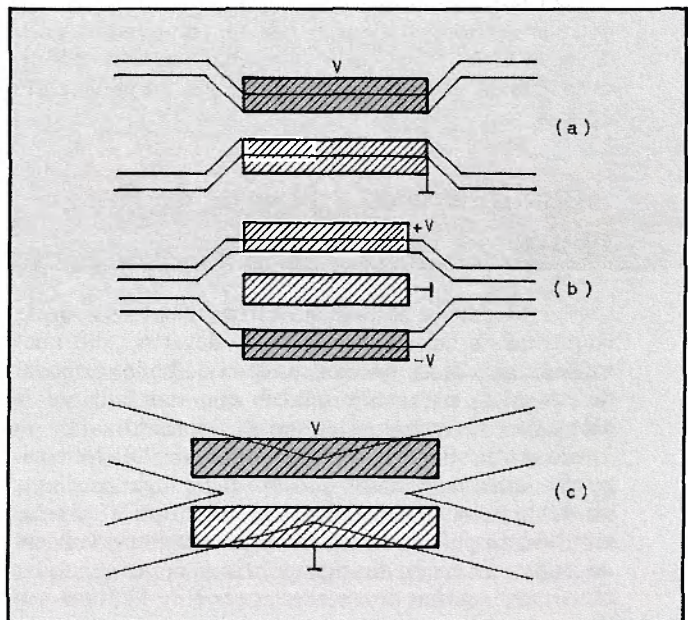


Figura 7. Elementos de conmutación integrados. a) Conmutador direccional. b) Interferómetro Mach-Zehnder. c) Guías cruzadas o conmutador en X.

hace más de una década. Son los clásicos acopladores direccionales, de interferómetro de Mach-Zehnder o de guías cruzadas. Su estudio daría para más de un artículo y en algún caso ya han sido presentados aquí por otros autores. Sólo, y a modo de recordatorio, en la figura 7 se presentan algunas arquitecturas de conmutadores que permiten configuraciones de 4×4 . La realización de sus guías se lleva a cabo por las técnicas comentadas anteriormente en el apartado de materiales.

De una manera muy resumida podrían sintetizarse así los aspectos más señalados de los conmutadores fotónicos en los siguientes puntos:

a) La gran cantidad de sistemas de conmutación fotónica existente indica que su desarrollo se encuentra todavía en sus fases iniciales. Asimismo, los méritos de cada uno de ellos no están todavía demasiado claros.

b) Los conmutadores ópticos parece que son los más indicados para los métodos de división en tiempo, dado que minimizan el número de conmutadores necesarios y, en consecuencia, las pérdidas. Por el contrario, los conmutadores optoelectrónicos son los más indicados para las matrices de división por longitud de onda, por frecuencia y por espacio.

c) La interfase entre las formas óptica y electrónica de una señal es el punto clave de la conmutación. Los distintos tipos de conmutadores optoelectrónicos existentes parecen tener un potencial considerable en aquellos casos en los que dicha conversión de señales no supone una desventaja o en los que el procesado electrónico dentro del propio chip es una clara ventaja.

d) Mientras que existe una gran variedad de formas de realizar matrices de configuración en estrella, no ocurre lo mismo con los sistemas distribuidos basados en configuraciones en bus. Esto lleva consigo el que aparezca una cierta incompatibilidad entre transmisión fotónica y conmutación fotónica. Esta incompatibilidad es el resultado de la competición entre el sistema de conmutación y el de transmisión, con la potencia de la señal. Este hecho puede ser apreciablemente modificado con la posible aparición de los amplificadores ópticos.

Amplificadores y láseres de fibra óptica

Como ya se ha dicho anteriormente, una de las etapas más cruciales a la hora de llevar a cabo unas totales comunicaciones ópticas es la de poder disponer de elementos puramente ópticos que sean capaces de amplificar las señales luminosas, portadoras de la información, sin necesidad de ningún auxilio electrónico. En la actualidad este proceso tiene lugar mediante un doble paso, transformando la señal óptica en señal eléctrica, amplificando ésta electrónicamente, y volviendo a una conversión de señal eléctrica a óptica. En todas estas fases pueden aparecer una serie de factores que lleguen a alterar el contenido de la señal perturbando, de alguna manera, las características de la transmisión. Sería, pues, conveniente intentar que, en lo posible, fueran eliminadas del sistema.

La única solución que puede pensarse es, evidentemente, la de la aparición del equivalente a los amplificadores electrónicos, pero de carácter fotónico. Esta solución, aunque todavía lejos de poderse llevar a cabo de una forma absolutamente rutinaria, existe ya como concepto desde los primeros tiempos del láser. No es otra que la de los amplificadores láser, que puede verse en cualquier libro de texto. Su aplicación a los casos en que es necesaria la obtención de grandes potencias de radiación láser ha sido habitual e innumerables ejemplos están presentes en muchos lugares.

Pero su aplicación a comunicaciones ópticas dista, como se ha dicho antes, de poderse considerar

inmediata. A pesar de ello, los últimos resultados, que brevemente serán presentados aquí, indican que, de alguna manera, parece que se está en el buen camino. Y para ver este camino parece oportuno, en primer lugar, que se planteen de forma concreta cuáles son los requisitos más idóneos que deberían cumplir estos amplificadores láser.

Parece evidente que el primer requisito debe ser que se adapte, lo más cercanamente posible, a las condiciones de la transmisión por la fibra óptica. Esto lleva consigo el que, de manera inmediata, se plantee la necesidad de que el propio amplificador deba tener también forma de fibra óptica. Suponiendo que esto se consiga, el segundo factor, que a su vez es el más obvio, habría de ser el que la longitud de onda de trabajo del amplificador láser fuese idéntica a la de la radiación transmitida, o lo que es lo mismo, que se puedan tener amplificadores para 1,3 ó 1,55 micras. Finalmente, y a fin de no ser demasiado exigentes, el último requisito habría de ser que el bombeo, esto es, la aportación de energía óptica al amplificador, fuese por una parte sencillo y, por otra, fácilmente obtenible con elementos asequibles.

El primer requisito no presenta demasiados problemas. Desde 1963 existen en la literatura artículos en los que se plantean láseres de fibra óptica. Resulta interesante señalar este hecho, que indica que la primera entrada de las fibras en el escenario del procesado de la información, fue muy anterior a los trabajos de Kao en 1966. A pesar de ello, el tema estuvo prácticamente muerto hasta 1985, quizás porque hasta entonces la tecnología no estaba aún madura. En cualquier caso, las potencialidades de un láser, o en nuestro caso, de un amplificador de fibra óptica, no escapaban a nadie. La primera es su perfecta adaptación para acoplarse a sistemas ópticos, con una eficiencia mayor que la de otras configuraciones. Otra no menos importante es la de, por su propia geometría, ofrecer la posibilidad de una serie de configuraciones, ya planteadas para otros usos, que pueden ofrecer una gran versatilidad al presente dispositivo. Con esto nos estamos refiriendo a

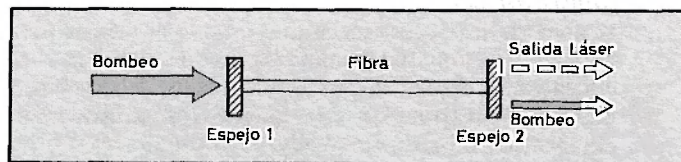


Figura 8. Esquema simplificado de un láser de fibra óptica. Si es λ_p la longitud de onda de bombeo y λ_L la de bombeo, el espejo 1 tiene una $R = 100\%$ para λ_L y 0% para λ_p . El espejo 2, por el contrario, tiene $R < 100\%$ para λ_p y $\approx 0\%$ para λ_L .

temas como el de los acopladores direccionales, a los resonadores o a los filtros. En consecuencia no parece haber problemas para este primer requisito. El esquema más simple de un láser de este tipo podría ser el de la figura 8.

El segundo, una vez conseguida una cierta tecnología de dopaje y de fabricación de fibras, no debe llevar consigo graves inconvenientes. Únicamente se requerirá encontrar el dopante adecuado para que pueda emitir radiación óptica de la frecuencia deseada. Y las tierras raras pueden ser los candidatos más

indicados, dadas sus especiales características. De entre ellas, convendría destacar, por ejemplo, la de que su espectro de salida es fuertemente dependiente del entorno molecular en el que los iones de estas tierras raras se encuentran. Y, gracias a ello, la frecuencia láser obtenida a partir de ellas podrá variarse variando el material soporte. Igualmente, en el caso de que este material soporte sea un vidrio, su fluorescencia es notablemente ancha, con lo que mediante las técnicas usuales de ajuste de la longitud de onda de salida, pueden coseguirse sintonías de laseado de 50 nm o superiores.

De acuerdo con lo anterior, convendría ver ahora cuáles son las tierras raras que permiten una mayor proximidad con las frecuencias de trabajo en comunicaciones ópticas. Estas frecuencias habrán de ser o bien 1,3 o bien 1,55 micras. Asimismo, sería conveniente que las longitudes de onda de bombeo estuvieran en regiones donde éste pudiera realizarse con diodos de semiconductor, y para esto, los dos materiales más extensivamente empleados hasta la fecha han sido el neodimio y el erbio. El Nd quizás puede considerarse el primero desde un punto de vista histórico, pero en la actualidad su importancia parece que se ha visto desbordada por el interés demostrado en varias partes del mundo hacia el segundo, el Er. Ambos materiales pueden considerarse como símbolos bastante característicos de los esquemas básicos de trabajo existentes desde el nacimiento del láser. Con esto nos estamos refiriendo

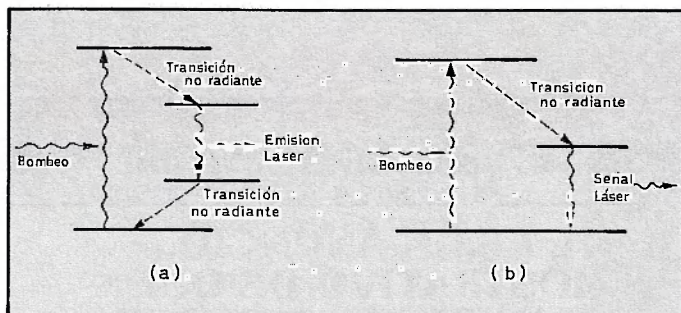


Figura 9. Esquemas convencionales de un láser de cuatro niveles (a), y de tres niveles (b).

a los láseres de cuatro y tres niveles respectivamente, cuya representación esquemática para los materiales que ahora nos interesan, aparece en la figura 9. Un poco a modo de curiosidad historiográfica, parece interesante señalar que el trabajo más importante con este tipo de láseres y amplificadores láser se ha desarrollado prácticamente sólo desde el año 1987 y que gran parte de él fue realizado por grupos universitarios de Southampton, siendo rápidamente continuado por los laboratorios de la British Telecom.

Queda como punto final a considerar el de la forma más idónea para realizar el bombeo. Ya hemos dicho que, por una parte, el elemento bombeador debería ser un diodo láser debido a su comodidad de manejo y fácil adaptación a la fibra óptica. Este hecho está aceptado de forma generalizada y poco hay que incidir sobre él. Los 800 nm de emisión de los láseres de AsGaAl y la banda de absorción del Er centrada en torno a esa misma frecuencia forman una pareja prácticamente perfecta. Por lo que respecta a la geometría

de bombeo, tampoco parece que haya muchas dudas en la forma de llevarla a cabo. Dado que el Er constituye un láser de tres niveles, son necesarias unas intensidades en la radiación de bombeo bastante más altas que si fuera uno de cuatro. Y para conseguirlo en un láser de fibra óptica, la manera más inmediata es la de efectuar un bombeo longitudinal, del estilo del presentado en la figura 8. En él se puede alcanzar una muy alta densidad de radiación en el punto de bombeo y mantener esta intensidad durante una longitud apreciable. Con todo ello, la estructura funcional básica puede considerarse así perfectamente asentada.

Pero, como ocurre siempre, al lado de una serie de ventajas aparecen también otra serie de inconvenientes en paralelo. Y el primero que tiene lugar es que el esquema de funcionamiento que se planteó en la figura 9 para el Er, no es totalmente correcto. El esquema que en realidad tiene lugar es el que aparece en la figura 10, donde puede apreciarse un hecho que

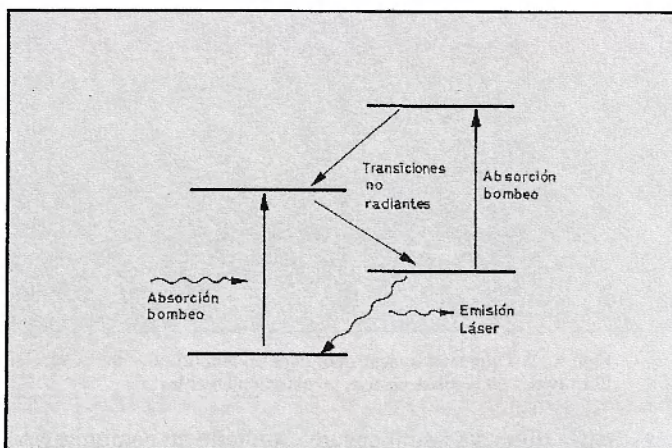


Figura 10. Esquema de las transiciones que aparecen en el erbio.

interrumpe toda la cadena de circunstancias favorables: la longitud de onda de absorción, que da lugar a la posterior inversión de poblaciones, coincide también con otra absorción que va del nivel láser superior a otro por encima de él, y que no tiene parte activa en el proceso. Esta nueva absorción entra en competencia con la otra dando lugar a una cierta despoblación del nivel activo. Este hecho, que puede tener una importancia considerable, está en estos momentos siendo estudiado de forma activa, tanto teórica como experimentalmente. No nos detendremos más aquí ya que habríamos de pasar a otros entornos un poco alejados del objeto de estas líneas. Sólo, y a modo de comentario, puede señalarse que las soluciones que se están barajando tienen su raíz en la consideraciones que se hicieron hace algunos párrafos, cuando se hablaba de las características de las tierras raras y se decía que entre sus propiedades estaba la de ser altamente influenciadas, en sus características de emisión, por el medio en el que se encontraban. Debido a ello, si en lugar de ser silicio, éste se altera, bien dopándolo con otro material inactivo ópticamente o cambiándolo en su totalidad, las bandas de absorción pueden modificarse lo suficiente como para que el efecto apuntado no tenga lugar. Sea cual sea la solución final, el concepto seguirá siendo el ya indicado.

Queda, como remate final para este apartado, el comentar someramente cuáles pueden ser las configuraciones a adoptar en el caso de amplificadores láser. Las tres posibles, dependiendo del lugar en el que se encuentra el amplificador, son las que aparecen en la figura 11. La primera se refiere a amplificación en el extremo emisor, la segunda como repetidor y la última como preamplificador de salida de la fibra. En todas ellas el efecto aplicado es el mismo, esto es, el del acoplo

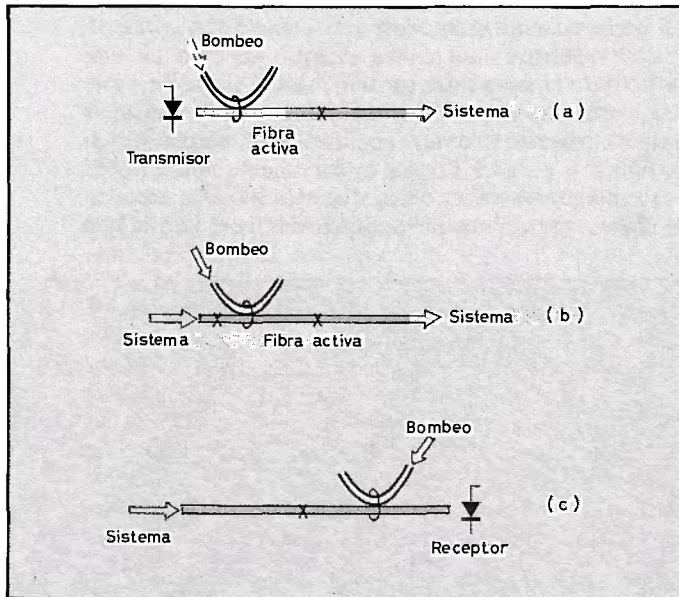


Figura 11. Diferentes aplicaciones para un amplificador de fibra óptica en comunicaciones (explicación en el texto).

entre fibras ya ampliamente estudiado en comunicaciones ópticas. Muchas otras configuraciones se han presentado para el caso de osciladores láser de fibra óptica, pero el interés actual en comunicaciones es bastante escaso, por lo que no nos detendremos en ellos.

Conclusiones finales

Dos han sido esencialmente los temas tratados en este artículo: la conmutación fotónica y los amplificadores de fibra óptica. Quizás, si hubiéramos pretendido abarcar la situación actual de las comunicaciones ópticas, deberíamos haber tratado otros muchos temas que hoy reciben una especial atención. Los sistemas coherentes, por ejemplo, parece que están nuevamente recibiendo un interés central en las últimas conferencias y, tras una etapa un poco lánguida en los últimos dos años, parece que vuelven otra vez por sus fueros. Esto se ha debido, entre otras cosas, a una considerable mejora de las características de emisión de los láseres, que han reducido la anchura de sus líneas y se han hecho más estables. Se podría hablar también de la situación en que se encuentran las fibras que trabajan en el infrarrojo, pero parece oportuno esperar a que con ellas se produzca una revolución equivalente a la experimentada con los amplificadores de fibra óptica. Quién sabe si en un próximo artículo éstas serán las protagonistas. Otros temas podrían ser las nuevas tecnologías de fabricación de componentes ópticos, e incluso los más

recientes componentes activos basados en los pozos cuánticos. Pero en unos casos porque el avance no ha sido tan señalado como el de los aquí tratados, y en otros porque todavía no se ha llegado a una situación clara, no ha parecido procedente tratarlos. En cualquier caso, las perspectivas que se pueden entrever sólo deben seguir un camino progresivo que, de forma encadenada, lleve a unas etapas claramente derivadas de lo que ocurre hoy. Como le comentaba Pangloss a Cándido [3]. «Todos los sucesos están encadenados en el mejor de los mundos posibles». Pero también, como le respondió éste «Todo eso está muy bien; pero vale más que cultivemos nuestro jardín». Y nuestro jardín, el de las comunicaciones ópticas en nuestro país, necesita todavía muchos cuidados.

Bibliografía

- [1] «Telecomms R&D at Bell Labs». CEI, Noviembre, 14-17, (1988).
- [2] J.A. Martín-Pereda. «Estado actual de las Comunicaciones Ópticas». Mundo Electrónico, 165, 46-53 (1986).
- [3] Voltaire, «Cándido o el optimismo».

José Antonio Martín Pereda, Catedrático del Departamento de Tecnología Fotónica de la Universidad Politécnica de Madrid, ha participado, como miembro del comité técnico, en todas las European Conference on Optical Communications (ECOC) que se han celebrado desde 1984, siendo el presidente de dicho comité en la de 1986. Participa también, como miembro del comité técnico, de las Integrated Optics and Optical Communications (IOOC) que tienen lugar bianualmente. Ha sido, asimismo, presidente de las Jornadas de Comunicaciones Ópticas celebradas en 1985 y en 1988 en Madrid.

¡ESTE ES UN ANUNCIO DEMOSTRATIVO DE QUE NO HAY OTRA OFERTA EN EL MERCADO MAS AMPLIA QUE LA NUESTRA!

ENTRE EN EL MUNDO DE LOS BIEN INFORMADOS



BOIXAREU EDITORES S.A.



¡SUSCRIBASE!